

基于飞秒光纤激光器的光频率梳设计与研制技术

吴浩煜^{1,2}, 时 雷¹, 马 挺¹, 马金栋¹, 路 桥¹, 孙 青³, 毛庆和^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所安徽光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100029

摘要 提出了一种基于飞秒光纤激光器的光频率梳设计与研制技术。设计与研制出脉冲宽度为 55 fs、频率为 210 MHz 的色散管理孤子锁模掺铒光纤激光器, 并优化设计了啁啾脉冲光纤放大链路; 由负色散高非线性光纤产生了频率范围为 1080~2320 nm 的倍频程超连续谱, 经 $f-2f$ (f 为频率) 自差拍检测出信噪比达 32 dB 的载波包络偏移频率; 通过将重复频率的 4 次谐波和载波包络偏移频率锁定到商用铷原子钟, 实现了对光频率梳的高精度锁定。测量结果表明, 1 s 计数门控时间下的重复频率和偏移频率标准偏差分别为 0.65 mHz 和 1.76 mHz, 100 s 采样时间下的 Allan 偏差分别为 1.74×10^{-13} 和 1.80×10^{-11} 。这种光纤光梳可望满足光频计量、光梳光谱、时频传递和微波产生等领域的应用需求。

关键词 激光器; 光学频率梳; 光纤激光器; 锁模激光; 重复频率; 载波包络偏移频率

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0601008

Design and Development Technique for Optical Frequency Comb Based on Femtosecond Fiber Lasers

Wu Haoyu^{1,2}, Shi Lei¹, Ma Ting¹, Ma Jindong¹, Lu Qiao¹, Sun Qing³, Mao Qinghe^{1,2}

¹Anhui Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Division of Optics, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

Abstract A design and development technique for optical frequency comb based on femtosecond fiber laser is proposed. A dispersion-managed solution mode-locked erbium-doped fiber laser with pulse width of 55 fs and frequency of 210 MHz is designed, and the chirped pulse fiber amplification link is optimized. An octave supercontinuum from 1080 nm to 2320 nm is generated by a fiber with high nonlinear, which makes the signal-to-noise ratio of the detected carrier-envelope offset frequency reach 32 dB by the $f-2f$ (f represents frequency) autodyne method. When the 4th harmonic wave of repetition rate and the carrier envelope offset frequency are locked to a commercial rubidium atomic clock, an optical frequency comb is locked with high precision. Measurement results show that the standard deviations of repetition rate and carrier envelope offset frequency are 0.65 mHz and 1.76 mHz at 1 s counter gate time, corresponding to the Allan deviations of 1.74×10^{-13} and 1.80×10^{-11} for 100 s sampling time, respectively. Such a fiber optical comb may meet applications in fields of optical frequency metrology, optical comb spectroscopy, timing and frequency transfer, microwave generation and so on.

Key words lasers; optical frequency comb; fiber lasers; mode-locked laser; repetition rate; carrier-envelope offset frequency

OCIS codes 140.3425; 120.3940; 140.7090

收稿日期: 2017-01-24; 收到修改稿日期: 2017-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(61377044, 61275186)、国家 973 计划(2013CB934304)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB21010300)

作者简介: 吴浩煜(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事超短脉冲光纤激光技术方面的研究。E-mail: w3980216@163.com

导师简介: 毛庆和(1963—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光纤光学、激光物理和激光器件等方面的研究。

E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn (通信联系人)

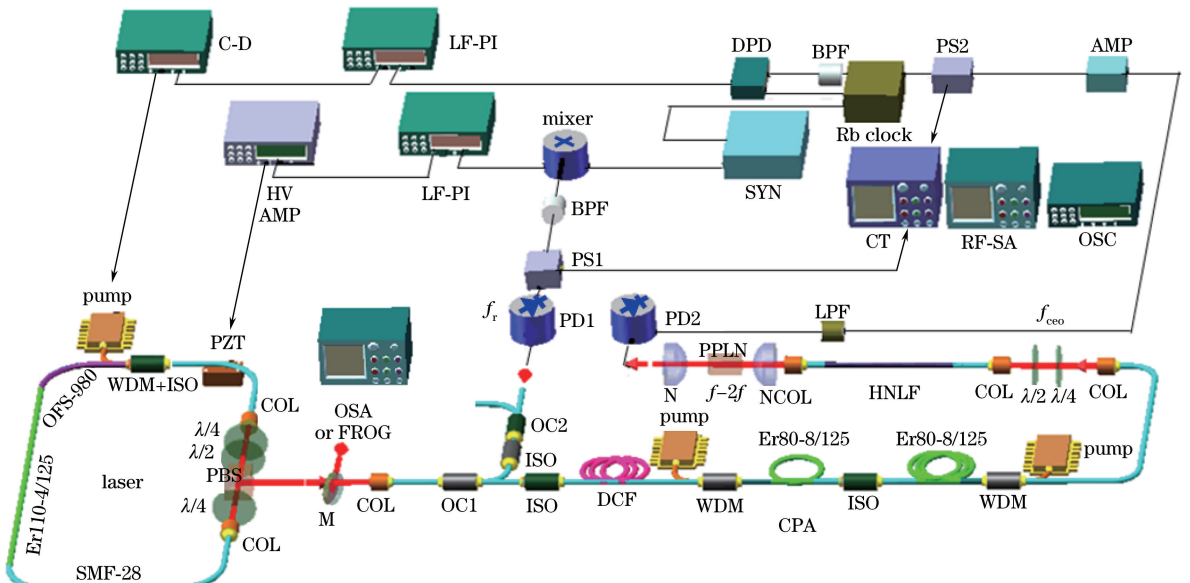
1 引 言

Hall^[1]和 Hansch^[2]因在光学频率梳及精密光谱学领域的杰出贡献共同获得了 2005 年诺贝尔物理学奖。光学频率梳(简称光梳)本质上是锁模激光脉冲重复频率(f_r)和载波包络偏移频率(f_{ceo})均严格锁定的激光光源^[3],在时域表现为等间隔、等幅度的超短脉冲序列,在频域则表现为规则且等间隔的梳齿线,相邻梳齿的间隔精确等于激光脉冲的重复频率。光梳是光频计量的强力工具,广泛应用于精密激光光谱、光钟、时频传递及相干测量等领域^[4-10]。

最初的光梳是基于飞秒锁模钛宝石激光器^[1-2],迄今,众多不同类型的飞秒激光器均可用来构建光梳^[11-15],其中,飞秒锁模光纤激光器具有结构简单、成本低和易于维护等优点,已逐渐成为构建光梳的主要激光振荡器。采用掺铒、镱及铥等光纤构成的孤子、色散管理孤子或自相似脉冲锁模光纤激光器已成功用于构建近红外光梳^[16-18],但相比之下,基于飞秒掺铒光纤激光器的光梳因处于 1.5 μm 工作波段更受青睐,相关研究工作也更系统深入。国内已有研究人员报道了各自设计与研制的光纤激光频率梳^[19-25],但对光纤光梳光电结构的完整描述相对缺乏,对满足光梳要求的飞秒光纤激光器及其后续光纤放大器设计也未做详细介绍。近年来,本课题组面向大气环境精密激光光谱的应用需求,也开展了飞秒光纤光梳的研究,自主研制出了低噪声光纤光梳。本文将详细描述所研制的基于色散管理孤子锁模光纤激光器的光纤光梳的结构设计与锁定技术,并对光梳性能进行测试与分析,以为光纤光梳的研究与应用提供参考。

2 结构设计及锁定方案

光梳锁定方案有多种,经典方案是将 f_r 和 f_{ceo} 均锁定至微波钟^[26],也可将 f_{ceo} 和某一梳齿线锁定到稳定的单频激光^[27],或者直接将光梳的两条梳齿线分别锁定到两台光学参考^[28]。为方便,采用经典锁定方案,微波钟为商用铷原子钟,图 1 为研制的光纤光梳结构示意图。由飞秒光纤激光器输出的脉冲序列进入光纤耦合器(OC1 和 OC2),并由光电探测器检测其重复频率,通过 $f-2f$ (f 为频率)自差拍方法检测 f_{ceo} ^[29],由于 $f-2f$ 自差拍检测需使用倍频程超连续谱,为此,将 OC1 输出的一路脉冲经非线性光纤放大压缩后,用



COL: collimator; $\lambda/4$: quarter-wave plate; $\lambda/2$: half-wave plate; PBS: polarization beam splitter; PZT: piezoelectric transducer; M: folded mirror; ISO: fiber-optic isolator; OC: optical fiber coupler; WDM: wavelength division multiplexer; HNLF: high nonlinear fiber; N: lens; PPLN: periodically poled lithium niobate; PD: photodetector; PS: power splitter; LPF: low-pass filter; BPF: band-pass filter; DPD: digital phase detector; AMP: low power amplifier; HVAMP: high voltage amplifier; OSC: oscilloscope; RF-SA: radio frequency spectrum analyzer; FROG: frequency-resolved optical gating; SYN: radio-frequency signal generator; CT: counter; LF-PI: loop filter with P-I control; C-D: current driver; DCF: dispersion compensation fiber; SMF: single mode fiber; CPA: chirped pulse amplification; OSA: optical spectrum analyzer

图 1 掺铒光纤光学频率梳结构

Fig. 1 Schematic of Er-doped fiber optical frequency comb

于抽运负色散高非线性光纤(HNLF)以获取倍频程超连续谱。由于负色散 HNLF 中超连续谱产生机制为孤子分裂、色散波产生及孤子自频移^[30],为提高超连续谱的相干性和提高偏移频率检测信噪比,要求经光纤放大压缩后的脉冲具有宽度窄(<100 fs)、能量大(>1 nJ)以及中心波长接近 HNLF 零色散点且处于负色散区等特点,因此,精心设计并研制了飞秒光纤激光器和非线性光纤放大链路。

尽管孤子、色散管理孤子和自相似脉冲光纤激光器均可用来构建光纤光梳,但研究表明,基于色散管理孤子光纤激光器的光梳噪声性能较好^[31-32],特别是通过调控使腔内净色散接近于 0 且为负时,可以获得性能极佳的飞秒锁模脉冲^[33]。相比于其他锁模机制^[34-36],非线性偏振旋转(NPE)可饱和吸收体具有响应快和调制深度大等优点^[37-38],利于获取极窄脉冲,因此,将基于分离器件的 NPE 锁模色散管理孤子光纤激光器作为光梳飞秒脉冲源,并由两个 $1/4$ 波片($\lambda/4$)、一个 $1/2$ 波片($\lambda/2$)和一个偏振分束棱镜(PBS)构成可饱和吸收体。为获取高重复频率飞秒锁模脉冲,采用一种混合器来实现波分复用器与光纤隔离器的双重功能^[39],通过精细设计腔内色散非线性等参量,确保激光器能够自启动并稳定工作。

非线性光纤放大链路选用啁啾脉冲光纤放大(CPA)方案。为抑制放大的自发辐射造成的增益自饱和和效应,采用了两级光纤放大器并在两级放大器之间插入光隔离器的结构^[40];为降低光纤放大链路因环境波动对光梳噪声性能的影响,CPA 链路的长度设计应尽可能短^[41-42]。为此,掺杂光纤选用负色散光纤;展宽器为正色散单模色散补偿光纤(DCF);压缩器为单模 SMF-28 光纤,其在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近为负色散,采用负色散掺杂光纤将有利于缩短光纤放大链路的长度。经光纤放大压缩后的脉冲经 $\lambda/4$ 和 $\lambda/2$ 波片后偏振态发生改变,进入负色散 HNLF 产生倍频程超连续谱,再经准直聚焦透镜耦合进入尺寸为 $12.3 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的周期极化铌酸锂(PPLN)晶体。通过调整相位匹配条件,使得超连续谱中 2200 nm 附近频移的孤子成分产生倍频,该倍频光再与超连续谱中 1100 nm 色散波成分产生拍频,由 $f-2f$ 自差拍法提取出载波包络偏移频率。

如图 1 所示,光电探测器 PD1 探测的电信号由功分器 PS1 分为两路:一路信号由频率计数器(CT)[示波器(OSC)]和频谱分析仪(RF-SA)监测重复频率;另一路信号经带通滤波后进入混频器,并与同步到商用铷原子钟的射频信号进行混频。经滤波放大后获取的控制信号用来反馈控制粘贴在锁模激光器腔内光纤上的压电陶瓷(PZT),由 PZT 的压电伸缩效应控制腔长,实现对 f_r 的控制。由 PD2 检测的信号经滤波放大后,由功分器 PS2 分为两路:一路信号用于 CT 和 RF-SA 监测载波包络偏移频率;另一路信号进入数字鉴相器,该鉴相器由铷钟提供 10 MHz 的参考信号,鉴相器的输出信号再经环路滤波后用于反馈控制飞秒光纤激光器的抽运源,实现对 f_{ceo} 的精确控制。事实上,根据固定点理论^[43],腔长(激光器抽运电流)的改变对光梳载波频率(载波包络偏移频率)的影响较大,而对处于零频附近的载波包络偏移频率(载波频率)的影响较小,因此,通过调控腔长和激光器抽运电流实现的对 f_r 和 f_{ceo} 的控制具有正交性。

研制的光梳采用光电分离结构,其中光学部分封装在 $18 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 9 \text{ cm}$ 的隔震隔热盒中,且对封装盒进行了温度控制,控制精度在 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内。

3 测试结果与讨论

锁定光梳的梳齿线频率满足 $f_n = nf_r + f_{\text{ceo}}$,其中 n 为梳齿模数。因此,通过调控腔长和抽运电流实现对 f_r 和 f_{ceo} 的正交反馈控制后,便可实现对光梳的锁定。但是,光梳稳定精度主要取决于反馈控制技术本身及反馈控制带宽,同时飞秒光纤激光器性能、光纤放大与超连续谱产生链路设计的优劣将影响所得超连续谱的相干性和检测的载波包络偏移频率的信噪比,前者无法通过反馈控制技术来抑制,后者直接关系到对 f_{ceo} 的反馈控制效果。为此,对飞秒光纤激光器、光纤放大链路、超连续谱产生链路、 f_{ceo} 检测以及 f_r 和 f_{ceo} 锁定单元分别进行了测试与分析。

3.1 色散管理孤子光纤激光器

采用 Liekki 公司的 Er110-4/125 型高掺杂光纤作为锁模光纤激光器的增益光纤,该光纤在 980 nm 处的吸收系数约为 60 dB/m ,在 1550 nm 处的正色散量约为 $0.011 \text{ ps}^2/\text{m}$ 。可饱和吸收体空间光路所用的一对准直器尾纤为 SMF-28 光纤,混合器信号端和公共端尾纤分别为 SMF-28 和 OFS-980 光纤,SMF-28 和 OFS-980 光纤在 1550 nm 处的色散分别约为 $-0.022 \text{ ps}^2/\text{m}$ 和 $-0.0013 \text{ ps}^2/\text{m}$ 。考虑到掺铒光纤增益峰会受到增益光纤长度及腔损耗的影响,为获取中心波长处于 $1.55 \mu\text{m}$ 附近的脉冲,选择长度为 0.37 m 的掺铒

光纤。经反复实验优化,实现了宽光谱、无多脉冲且可自启动的锁模运转,优化后腔内 SMF-28 光纤的长度为 0.28 m(其中与增益光纤相连的准直头 SMF-28 尾纤的长度为 0.15 m),OFS-980 光纤的长度为 0.19 m,这时,对应的腔内净色散约为 -0.00233 ps^2 ,腔内正负色散分别为 $+0.00407 \text{ ps}^2$ 和 -0.006407 ps^2 。

锁模光纤激光器由最大输出功率约为 1 W 的 980 nm 半导体激光器反向抽运,当抽运功率为 620 mW 时,通过调节可饱和吸收体波片组,获得无多脉冲现象且可自启动的稳定锁模脉冲序列。图 2(a)、(b)分别为 760 mW 抽运功率下由光谱分析仪(OSA)和频率分辨光逻辑门(FROG)测得的输出脉冲的光谱与脉冲宽度。可见,中心波长在 1565 nm 附近的光谱极为平坦,3 dB 光谱宽度可达 124 nm,远大于掺杂光纤增益光谱宽度,表明腔内非线性自相位调制已大幅拓宽了脉冲光谱;激光器直接输出和经光纤压缩后的脉冲宽度分别为 55 fs 和 50 fs[图 2(b)],表明激光器输出基本处于负色散光纤中脉冲宽度演化到最窄点附近^[44]。可以预见,由于 1565 nm 脉冲中心波长位于 HNLF 的负色散区,且与零色散波长仅相差 87 nm,而 50 fs 脉冲宽度表明经精心设计光纤放大器后的脉冲宽度依然可望被压缩到很窄,从而缩短产生倍频程超连续谱所用 HNLF 的长度,进而有利于增大产生的超连续谱的相干性,从而有利于腔外噪声的抑制^[30,45]。

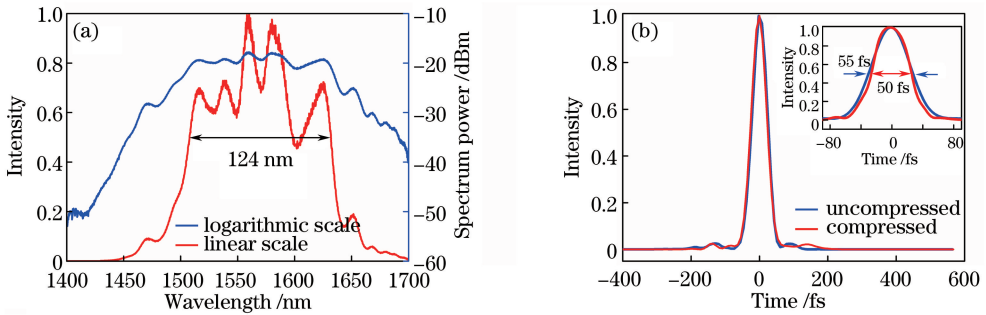


图 2 锁模光纤激光器输出脉冲的(a)光谱和(b)脉冲宽度

Fig. 2 (a) Spectrum and (b) pulse width of output pulse of mode-locked fiber laser

图 3(a)、(b)分别为由高速光电探测器后连接的 OSC 和 RF-SA 测得的输出脉冲序列和频谱,可见,脉冲重复频率约为 209.3 MHz,考虑到可饱和吸收体空间长度约为 80 mm,所测重复频率与激光器腔长完全吻合,所测脉冲频谱的信噪比优于 50 dB[分辨率带宽(RBW)为 300 kHz],表明输出脉冲为规整的脉冲序列。此外,输出脉冲平均功率为 96 mW,对应单脉冲能量高达 0.45 nJ,这为缩短产生倍频程超连续谱所用 HNLF 的长度提供了保障。

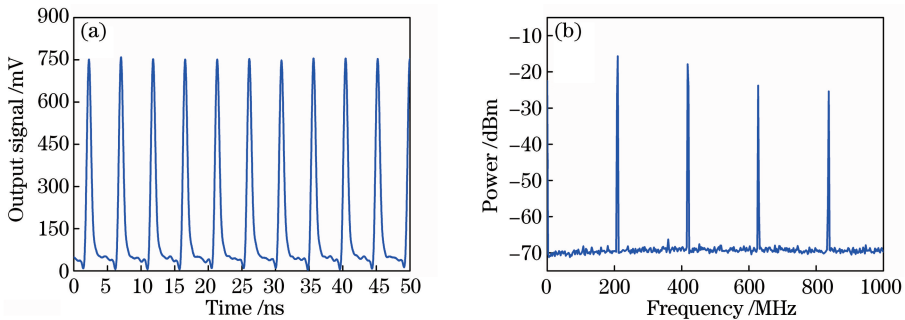


图 3 锁模光纤激光器的输出脉冲(a)序列和(b)频谱

Fig. 3 (a) Sequence and (b) frequency spectrum of output pulse of mode-locked fiber laser

3.2 CPA 放大、超连续谱产生与 f_{ceo} 测量

如前所述,CPA 放大链路包含两级光纤放大器,掺杂光纤均为 Liekki 公司的 Er80-8/125 型光纤,该光纤在 1550 nm 处为负色散,色散量为 $-0.025 \text{ ps}^2/\text{m}$,在 1530 nm 处的吸收系数为 80 dB/m。前后两级光纤放大器均由 980 nm 半导体激光器进行抽运,分别采用正向和反向抽运,经实验优化后的掺杂光纤长度分别为 33 cm 和 75 cm。CPA 系统展宽器采用色散量为 $+0.046 \text{ ps}^2/\text{m}$ 、长度为 1.8 m 的色散补偿光纤,使得进入第一级放大器时的脉冲宽度展宽至约 1.7 ps,以克服光纤放大过程中的非线性积累。选用负色散掺杂光纤作为放大器的增益光纤,使得仅需 2.2 m 的 SMF-28 光纤(即总链路长度约为 5.6 m)就可对放大器输出脉

冲进行很好的压缩,且避免了因光纤链路过长导致的诸如 Raman 频移等非线性效应的影响^[46]。

上述 CPA 的良好效果已由实验得到了证实。由色散补偿光纤展宽输入到第一级光纤放大器的平均功率为 13.4 mW,脉冲经净增益分别为 8.9 dB 和 6.3 dB 的两级光纤放大,再经光纤压缩后由 FROG 对脉冲宽度的测量结果如图 4(a)所示。可见,脉冲宽度约为 60 fs,表明脉冲经 CPA 链路并未被叠加过大的非线性啁啾,这也可由光纤放大器输出端测得的光谱看出。由图 4(a)可以看出,光谱的中心波长依然处于 1565 nm 附近,且未呈现严重的附加亚结构,表明 CPA 过程叠加的非线性积累不大^[47]。必须指出,为消除偏振模随机变化对倍频程超连续谱产生的影响,脉冲进入非保偏 HNLF 之前已由插入至链路中的 $\lambda/4$ 和 $\lambda/2$ 波片调控为线偏振,而上述对脉冲宽度的测量结果是由 HNLF 输入端测得的。

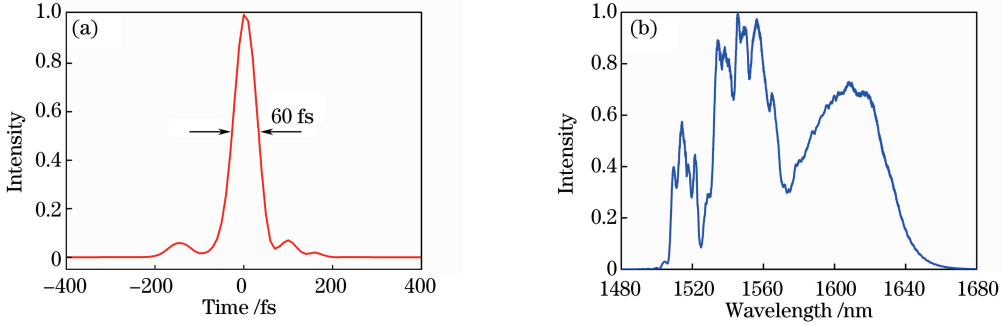


图 4 CPA 压缩后的(a)脉冲宽度和(b)光谱

Fig. 4 (a) Pulse width and (b) spectrum after CPA compression

产生倍频程超连续谱的 HNLF 光纤在 1550 nm 处的色散和非线性系数分别为 $-0.0019 \text{ ps}^2/\text{m}$ 和 $10.6 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。由于光纤链路中不同光纤之间模场失配会产生熔接损耗,实测输入至 HNLF 内的脉冲平均功率为 280 mW,对应的峰值功率约为 22 kW。经实验优化后选取的 HNLF 长度为 65 cm,图 5 为产生的倍频程超连续谱,可见,光谱覆盖范围为 1080~2320 nm,并且从图中可清晰地分辨出 2200 nm 附近的孤子峰和 1100 nm 附近的色散波^[30],从而有利于后续经 $f-2f$ 自差拍提取出高信噪比的 f_{ceo} 。

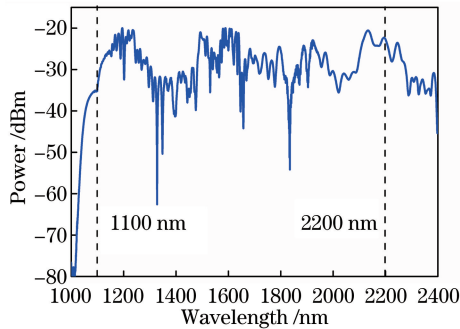


图 5 经 HNLF 产生的倍频程超连续谱

Fig. 5 Octave supercontinuum generated by HNLF

为实现图 5 中 2200 nm 处孤子成分倍频后与 1100 nm 色散波成分之间的差拍,必须克服倍频光与基频光之间因光纤色散导致的时间延迟,为此,在 HNLF 后接入了长度为 12 cm 的一段 SMF-28 光纤来确保二者之间的同步^[48]。经优化 PPLN 倍频效率后,在 PD2 后由 RF-SA 测得拍频谱,结果如图 6(a)所示。由图可见,拍频谱中出现了 $f_{\text{ceo}} \pm k f_r (k=0,1,2 \dots)$ 多个拍频谱峰,使得理论上处于 1~3 THz 范围内的载波包络偏频频率可在射频波段测得^[49],正是这种效应使得重复频率为 209.3 MHz 的峰两旁相隔 15 MHz 处出现了对称边带,而在 15 MHz 处则出现信噪比高达 32 dB(RBW 为 300 kHz)的单峰,该单峰拍频信号为实测的 f_{ceo} 。32 dB 信噪比并不是特别高,主要原因是 $f-2f$ 拍频采用了空间光路且所用光学元件未镀宽带增透膜。此外,因 PD2 的带宽为 50 MHz,造成了图中拍频谱在 50 MHz 后出现滚降现象。图 6(b)为 3 kHz 的 RBW 下经 10 次测量 f_{ceo} 并取平均后的 RF 谱,采用洛伦兹线型拟合,半峰全宽(FWHM)为 83.1 kHz,该线宽值相对较窄^[19-20],表明飞秒激光器及后续光路的噪声性能优良。

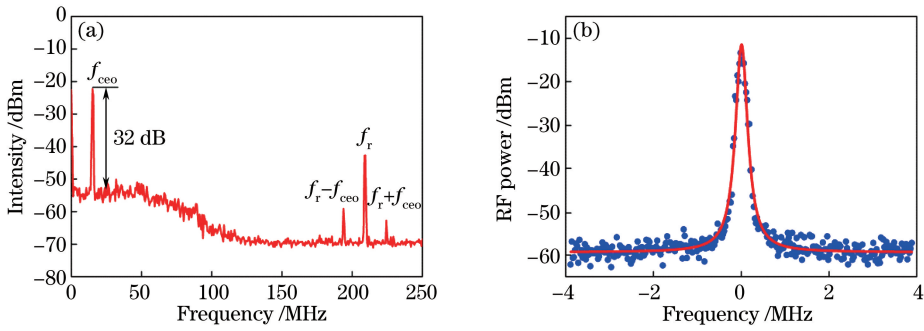


图 6 (a)由 $f-2f$ 自差拍法测得的 RF 谱(RBW 为 300 kHz);(b) 10 次测量 f_{ceo} 平均后的 RF 谱(RBW 为 3 kHz,FWHM 为 83.1 kHz)

Fig. 6 (a) RF spectrum measured by $f-2f$ autodyne method (RBW is 300 kHz);

(b) RF spectrum of averaged f_{ceo} after ten measurements (RBW is 3 kHz, FWHM is 83.1 kHz)

3.3 f_r 与 f_{ceo} 的锁定

由于 f_r 和 f_{ceo} 的反馈控制信号分别是通过混频器中与同步到铷原子钟的射频信号之间的混频和滤波放大后和铷原子钟参考下经鉴相和环路滤波后获得的,为确定这两个反馈控制信号的大小和实现对光梳的高精度锁定,必须分别确定 f_r 和 f_{ceo} 与 PZT 控制电压和抽运激光器驱动电流之间的变化关系,图 7 分别给出了 f_r 和 f_{ceo} 实测变化趋势。由图 7(a)可见,在 0~100 V 范围内,重复频率随 PZT 控制电压的增加呈线性减小,由 0 V 对应的 209.3217 MHz 变化到 100 V 对应的 209.3197 MHz,对应的压控灵敏度为 -20.39 Hz/V。由图 7(b)可知,当驱动电流由 814 mA 增加到 850 mA 时,载波包络偏移频率由 8.51 MHz 线性增大到 42.42 MHz,线性调谐范围超过 34 MHz,对应的压控灵敏度为 0.95 MHz/mA。

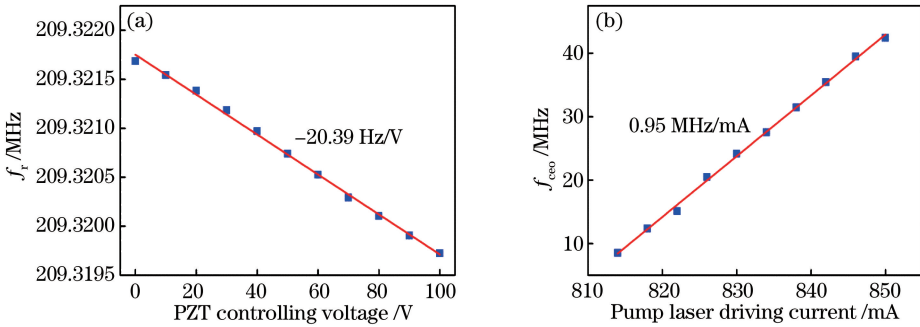


图 7 (a) f_r 随 PZT 控制电压的变化;(b) f_{ceo} 随抽运激光器驱动电流的变化

Fig. 7 (a) Variation in f_r with PZT controlling voltage; (b) variation in f_{ceo} with pump laser driving current

为抑制噪声,采用锁定高次谐波相位的方案来锁定光梳重复频率^[50]。将重复频率的 4 次谐波 (837.2 MHz) 在混频器中与同步于铷原子钟的射频信号进行模拟混频,产生实时误差信号,由图 7(a)中的实测数据确定环路滤波器的 P-I 参数,利用环路滤波器及线性高压放大器获取 PZT 反馈控制信号,从而实现对 f_r 的闭环相位锁定。图 8(a)为由 1 s 采样时间下 CT 记录的相位锁定后重复频率在 3.5 h 内的实时抖动

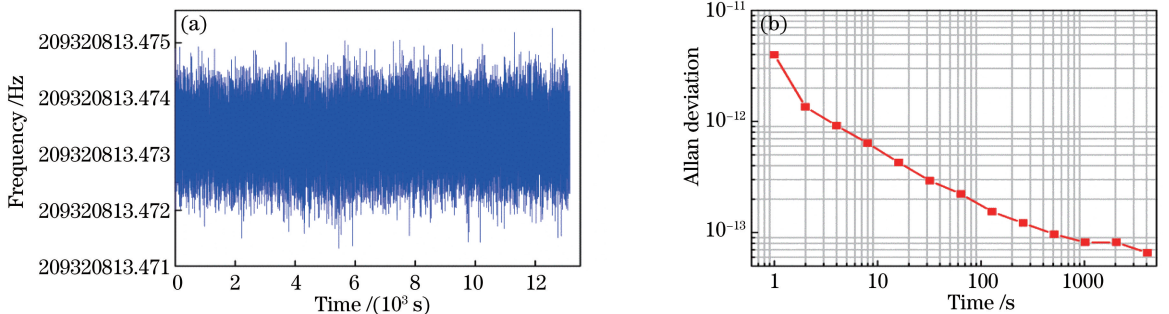


图 8 (a) 1 s 采样时间下相位锁定的 f_r 的实时抖动;(b)根据图 8(a)中数据计算的 Allan 偏差

Fig. 8 (a) Real time jitter of phase-locked f_r with sampling time of 1 s; (b) Allan deviation calculated according to data in Fig. 8 (a)

动,由此可得其标准偏差约为 0.65 mHz。根据图 8(a)数据,可计算出锁定后 f_r 的 Allan 偏差,结果如图 8(b)所示。由图可见,1,100,1000 s 采样时间下的 Allan 偏差分别为 3.93×10^{-12} , 1.74×10^{-13} , 8.17×10^{-14} ,这已与所用商用铷原子钟的频率稳定度相当,表明反馈控制 PZT 的响应带宽已满足对 f_r 的良好锁定^[51],锁定精度主要受限于铷原子钟的精度。

通过调节抽运驱动电流,将 f_{ceo} 调至铷原子钟提供的 10 MHz 参考附近进行数字鉴相,产生实时误差信号,同时,由图 7(b)中的实测数据确定环路滤波器的 P-I 参数,利用环路滤波器获取抽运电流反馈控制信号,实现对 f_{ceo} 的闭环锁定。图 9(a)为 1 s 时间采样 CT 记录的相位锁定后的载波包络偏移频率在 3.5 h 内的实时抖动,对应的标准偏差约为 1.76 mHz。同样,根据图 9(a)数据,也可计算出锁定后 f_{ceo} 的 Allan 偏差,结果如图 9(b)所示。由图可见,1,100,1000 s 采样时间下的 Allan 偏差分别为 1.74×10^{-10} , 1.80×10^{-11} , 5.58×10^{-12} ,表明 f_{ceo} 锁定效果良好。当采用该光梳测量 200 THz 附近的激光频率时,若采样时间为 100 s,则由 f_{ceo} 引入的频率不确定度量级约为 10^{-18} ,表明该光梳可满足光频计量、高精度时频传递和稳定微波产生等领域的应用需求。

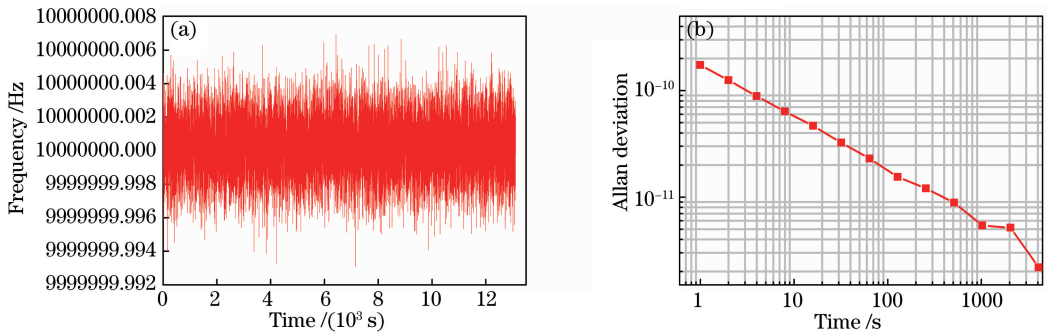


图 9 (a) 1 s 采样时间下相位锁定后的 f_{ceo} 的实时抖动;(b)根据图 9(a)中数据计算的 Allan 偏差

Fig. 9 (a) Real time jitter of phase-locked f_{ceo} with sampling time of 1 s; (b) Allan deviation calculated according to data in Fig. 9(a)

4 结 论

自主设计与研制了基于 $f-2f$ 自差拍法的光纤光梳,该光梳将色散管理孤子锁模掺铒光纤激光器作为振荡器,设计出的紧凑的 CPA 链路使得由高非线性光纤产生的超连续谱中经 $f-2f$ 自差拍法提取的 f_{ceo} 的信噪比达 32 dB。通过将实测的 $4f_r$ 和 f_{ceo} 同时锁定到商用铷原子钟,在 3.5 h 内锁定的 f_r 和 f_{ceo} 的标准偏差分别为 0.65 mHz 和 1.76 mHz,100 s 采样时间下的 Allan 偏差分别为 1.74×10^{-13} 和 1.80×10^{-11} 。该光纤激光频率梳可望满足光频计量、光梳光谱、高精度时频传递和稳定微波产生等领域的应用需求。

参 考 文 献

- [1] Hall J L. Nobel lecture: defining and measuring optical frequencies[J]. Reviews of Modern Physics, 2006, 78(4): 1279-1295.
- [2] Hänsch T W. Nobel lecture: passion for precision[J]. Reviews of Modern Physics, 2006, 78(4): 1297-1309.
- [3] Cundiff S T, Ye J. Colloquium: femtosecond optical frequency combs[J]. Reviews of Modern Physics, 2003, 75(1): 325-342.
- [4] Diddams S A, Udem T, Bergquist J C, *et al.* An optical clock based on a single trapped¹⁹⁹Hg⁺ ion[J]. Science, 2001, 293(5531): 825-828.
- [5] Minoshima K, Matsumoto H. High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser[J]. Applied Optics, 2000, 39(30): 5512-5517.
- [6] Fox R W, Washburn B R, Newbury N R, *et al.* Wavelength references for interferometry in air[J]. Applied Optics, 2005, 44(36): 7793-7801.
- [7] Swann W C, Newbury N R. Frequency-resolved coherent lidar using a femtosecond fiber laser[J]. Optics Letters, 2006, 31(6): 826-828.

- [8] Holman K W, Hudson D D, Ye J, *et al.* Remote transfer of a high-stability and ultralow-jitter timing signal[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(10): 1225-1227.
- [9] Coddington I, Swann W C, Newbury N R. Coherent multiheterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 013902.
- [10] McFerran J J, Swann W C, Washburn B R, *et al.* Suppression of pump-induced frequency noise in fiber-laser frequency combs leading to sub-radian f_{ceo} phase excursions[J]. *Applied Physics B*, 2007, 86(2): 219-227.
- [11] Apolonski A, Poppe A, Tempea G, *et al.* Controlling the phase evolution of few-cycle light pulses[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(4): 740-743.
- [12] Washburn B R, Swann W C, Newbury N R. Response dynamics of the frequency comb output from a femtosecond fiber laser[J]. *Optics Express*, 2005, 13(26): 10622-10633.
- [13] Stumpf M C, Pekarek S, Oehler A E H, *et al.* Self-referenceable frequency comb from a 170-fs, 1.5- μm solid-state laser oscillator[J]. *Applied Physics B*, 2010, 99(3): 401-408.
- [14] Kim K, Washburn B R, Wilpers G, *et al.* Stabilized frequency comb with a self-referenced femtosecond Cr: forsterite laser[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(8): 932-934.
- [15] Holzwarth R, Zimmermann M, Udem T, *et al.* White-light frequency comb generation with a diode-pumped Cr:LiSAF laser[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(17): 1376-1378.
- [16] Washburn B R, Diddams S A, Newbury N R, *et al.* Phase-locked, erbium-fiber-laser-based frequency comb in the near infrared[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(3): 250-252.
- [17] Ruehl A. Advances in Yb: fiber frequency comb technology[J]. *Optics and Photonics News*, 2012, 23(5): 30-35.
- [18] Lee C C, Mohr C, Bethge J, *et al.* Frequency comb stabilization with bandwidth beyond the limit of gain lifetime by an intracavity graphene electro-optic modulator[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(15): 3084-3086.
- [19] Meng Fei, Cao Shiyang, Cai Yue, *et al.* Study of the femtosecond fiber comb and absolute optical frequency measurement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 100601.
孟 飞, 曹士英, 蔡 岳, 等. 光纤飞秒光学频率梳的研制及绝对光学频率测量[J]. *物理学报*, 2011, 60(10): 100601.
- [20] Zhang Y Y, Yan L L, Zhao W Y, *et al.* A long-term frequency-stabilized erbium-fiber-laser-based optical frequency comb with an intra-cavity electro-optic modulator[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(6): 064209.
- [21] Yang Xingtao, Chen Xiuliang, Zhao Jian, *et al.* Phase noise suppression and feedback control of carrier-envelope phase in an Yb-doped fiber frequency comb[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2014, 44(7): 698-704.
杨行涛, 陈修亮, 赵 健, 等. 掺镱光学频率梳噪声抑制与载波包络相位锁定[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44(7): 698-704.
- [22] Droste S, Ycas G G, Washburn B R, *et al.* Optical frequency comb generation based on erbium fiber lasers[J]. *Nanophotonics*, 2016, 5(2): 196-213.
- [23] Kim J, Song Y J. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(3): 465-540.
- [24] Meng Fei, Cao Shiyang, Zhao Guangzhen, *et al.* Application of an Er: doped fiber comb for Sr lattice clock[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0702012.
孟 飞, 曹士英, 赵光贞, 等. 掺铒光纤光梳在锶晶格钟中的应用研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0702012.
- [25] Xia Chuanqing, Wu Tengfei, Zhao Chunbo, *et al.* Experiment study on carrier-envelope offset frequency locking in a femtosecond fiber comb[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 123201.
夏传青, 武腾飞, 赵春播, 等. 光纤飞秒光学频率梳载波包络偏移频率锁定的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 123201.
- [26] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 233-237.
- [27] Ye J, Hall J L, Diddams S A. Precision phase control of an ultrawide-bandwidth femtosecond laser: a network of ultrastable frequency marks across the visible spectrum[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(22): 1675-1677.
- [28] Deschênes J D, Giaccari P, Genest J. Optical referencing technique with CW lasers as intermediate oscillators for continuous full delay range frequency comb interferometry[J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 23358-23370.
- [29] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, *et al.* Carrier envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis[J]. *Science*, 2000, 288(5466): 635-639.
- [30] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1135-1184.

- [31] Song Y J, Jung K Y, Kim J W. Impact of pulse dynamics on timing jitter in mode-locked fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(10): 1761-1763.
- [32] Nugent-Glandorf L, Johnson T A, Kobayashi Y, *et al.* Impact of dispersion on amplitude and frequency noise in a Yb-fiber laser comb[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(9): 1578-1580.
- [33] Tamura K, Nelson L E, Haus H A. Soliton versus nonsoliton operation of fiber ring lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(2): 149-151.
- [34] Baumann E, Giorgetta F R, Nicholson J W, *et al.* High-performance, vibration-immune, fiber-laser frequency comb[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(5): 638-640.
- [35] Liu T A, Newbury N R, Coddington I. Sub-micron absolute distance measurements in sub-millisecond times with dual free-running femtosecond Er fiber-lasers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18501-18509.
- [36] Lim J, Knabe K, Tillman K A, *et al.* A phase-stabilized carbon nanotube fiber laser frequency comb[J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 14115-14120.
- [37] Tamura K, Haus H A, Ippen E P. Self-starting additive pulse mode-locked erbium fibre ring laser[J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(24): 2226-2228.
- [38] Ilday F Ö, Buckley J R, Clark W G, *et al.* Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(21): 213902.
- [39] Li P, Shi L, Sun Q, *et al.* 312 MHz, compact all-normal-dispersion Yb-fiber ring laser with an integrated WDM-ISO[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(3): 031403.
- [40] Mao Q, Lit J W Y. Amplification enhancement of L-band erbium-doped fiber amplifiers by reflection scheme[J]. *Optics Communications*, 2002, 201(1-3): 61-69.
- [41] Cao Shiyang, Meng Fei, Lin Baike, *et al.* Precise frequency control of an Er-doped fiber comb[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(13): 134205.
曹士英, 孟 飞, 林百科, 等. 长时间精密锁定的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳[J]. *物理学报*, 2012, 61(13): 134205.
- [42] Han Hainian, Wei Zhiyi. Low phase noise optical frequency comb[J]. *Physics*, 2016, 45(7): 449-457.
韩海年, 魏志义. 低相噪光学频率梳[J]. *物理*, 2016, 45(7): 449-457.
- [43] Telle H R, Lipphardt B, Stenger J. Kerr-lens mode-locked lasers as transfer oscillators for optical frequency measurements[J]. *Applied Physics B*, 2002, 74(1): 1-6.
- [44] Tamura K, Ippen E P, Haus H A, *et al.* 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(13): 1080-1082.
- [45] Li P, Wang G Z, Li C, *et al.* Characterization of the carrier envelope offset frequency from a 490 MHz Yb-fiber-ring laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 16017-16022.
- [46] Zhao W, Hu X H, Wang Y S. Femtosecond-pulse fiber based amplification techniques and their applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 512-524.
- [47] Schimpf D N, Seise E, Limpert J, *et al.* The impact of spectral modulations on the contrast of pulses of nonlinear chirped-pulse amplification systems[J]. *Optics Express*, 2008, 16(14): 10664-10674.
- [48] Sinclair L C, Deschênes J D, Sonderhouse L, *et al.* Invited article: a compact optically coherent fiber frequency comb[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(8): 081301.
- [49] Newbury N R, Washburn B R. Theory of the frequency comb output from a femtosecond fiber laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2005, 41(11): 1388-1402.
- [50] Peng J L, Ahn H, Shu R H, *et al.* Highly stable, frequency-controlled mode-locked erbium fiber laser comb[J]. *Applied Physics B*, 2007, 86(1): 49-53.
- [51] Sinclair L C, Coddington I, Swann W C, *et al.* Operation of an optically coherent frequency comb outside the metrology lab[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6996-7006.